RECENTI VARIAZIONI DELLA PROPAGAZIONE DELLA MAREA IN LAGUNA DI VENEZIA: EFFETTI INDOTTI DALLE OPERE FISSE ALLE BOCCHE DI PORTO

Bruno Matticchio*, Luca Carniello**, Devis Canesso*, Elena Ziggiotto**, Marco Cordella***

1. *Introduzione*

La laguna di Venezia è la più ampia laguna del Mediterraneo con una superficie di circa 550 km^2, dei quali circa 130 km^2 sono costituiti da isole e terre emerse e i restanti 420 km^2 da specchi d'acqua. Essa è posta nella parte settentrionale del mare Adriatico, al quale è collegata mediante tre bocche di porto (Lido, Malamocco e Chioggia), ed è caratterizzata da profondità decisamente ridotte (mediamente di circa 1 m se si escludono i canali) e da una morfologia molto articolata.

Il regime delle maree nell'Alto Adriatico è caratterizzato da escursioni che raggiungono valori dell'ordine di 1 m e che sono tra le più ampie del Mediterraneo. Gli specchi d'acqua lagunari seguono le oscillazioni del mare antistante, con un andamento che si differenzia nel bacino secondo complesse dinamiche tipiche dei sistemi tidali poco profondi [1].

La propagazione della marea all'interno della laguna è condizionata da molteplici fattori, che vanno dalla conformazione delle bocche di porto alla morfologia delle tipiche forme lagunari (canali, bassifondi, barene, velme, ecc.). Procedendo dalle bocche verso l'interno della laguna, il segnale che descrive l'oscillazione della superficie libera modifica la sua ampiezza e la sua forma, subendo nel contempo un

* Ipros Ingegneria Ambientale s.r.l., Padova.

** Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA), Università degli Studi di Padova.

*** ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Servizio Laguna di Venezia.

progressivo ritardo di fase. Queste trasformazioni giocano un ruolo primario sulla circolazione delle correnti lagunari, poiché le correnti stesse sono principalmente governate dai dislivelli istantanei che si generano tra un punto e l'altro della laguna. Piccole variazioni dei dislivelli istantanei possono modificare sensibilmente l'intensità e la direzione delle correnti interne alla laguna e possono influenzare la posizione dei cosiddetti "partiacque" ossia delle fasce che, in prima approssimazione, rappresentano i limiti dei sotto-bacini afferenti a ciascuna delle tre bocche di porto [2].

Le significative trasformazioni subite dalla laguna ad opera dell'uomo nel corso dei secoli hanno modificato in modo non trascurabile il locale regime delle maree. Tra gli interventi più significativi sono da menzionare la costruzione delle dighe foranee alle bocche di porto e la riduzione della superficie degli specchi d'acqua aperti alla libera espansione delle maree mediante la perimetrazione delle valli da pesca. Nel corso del secolo scorso, particolarmente rilevanti sono stati anche gli effetti dello scavo dei grandi canali navigabili. Primo fra essi il canale Vittorio Emanuele (1920-1925), realizzato per collegare il polo industriale di Porto Marghera al canale della Giudecca e quindi direttamente al mare e, successivamente, il cosiddetto "Canale dei Petroli" (1964-1968) che collega la stessa Zona industriale di Porto Marghera con la Bocca di Malamocco.

Le dinamiche mareali sono state influenzate anche dalle variazioni morfologiche che la laguna ha subito nel tempo (in particolare la riduzione della superfice delle barene e l'interrimento di molti canali), in parte dovute ai naturali processi evolutivi tipici degli ambienti lagunari, ma in gran parte innescate dagli interventi antropici stessi [3] [4] [5].

Le variazioni nel tempo dell'idrodinamica lagunare sono state analizzate nel dettaglio in alcuni recenti studi in cui, mediante modelli matematici, è stata ricostruita l'evoluzione della morfologia lagunare a partire dall'inizio del 1800 e fino ai giorni nostri [5]. Altri lavori hanno analizzato, pur se limitatamente a epoche più recenti, i medesimi aspetti sulla base delle registrazioni dell'andamento della marea in laguna [4] [6] [8].

In questo lavoro si evidenziano alcune non trascurabili variazioni intervenute negli ultimi anni sulla propagazione delle maree, che possono essere ricondotte agli interventi realizzati alle tre bocche di porto per l'installazione delle paratoie mobili (Progetto Mo.S.E.) che, una volta ultimate, dovranno proteggere dalle "acque alte" la città di Venezia e gli altri centri urbani presenti in laguna. Le opere che sono state realizzate hanno comportato infatti la modifica della configurazione degli accessi alla laguna e, conseguentemente, del locale assetto delle correnti di marea e delle resistenze idrauliche che le correnti incontrano nel superamento di ciascuna bocca. Sono significativi, al riguardo, la realizzazione delle dighe curvilinee all'esterno (le cosiddette "lunate") ma soprattutto il restringimento della sezione delle bocche per la realizzazione delle spalle del Mo.S.E. e dei porti rifugio con annesse conche di navigazione. In particolare la larghezza minima della Bocca di Malamocco è passata da 450 m nella configurazione antecedente all'inizio dei lavori a 375 m attuali (riduzione del 17%). Per la Bocca di Chioggia la larghezza minima è variata da 485 m a 360 m (riduzione del 26%). Infine, la costruzione dell'isola al centro della Bocca di Lido ha comportato per tale bocca la creazione di due varchi di larghezza pari a 400 m e 415 m al posto di un unico varco che, nel punto più stretto, misurava 890 m (riduzione dell'8%). L'entità non trascurabile dei restringimenti risulta evidente osservando la Fig. 1 in cui è riportata una sequenza di foto aeree che documenta le variazioni conseguenti alla realizzazione dei lavori che hanno interessato le tre bocche, iniziati formalmente il 14 maggio 2003 con la posa della prima pietra.

Il presente lavoro è organizzato come segue. Il paragrafo 2 descrive il complesso dei dati mareografici che sono stati acquisiti ed elaborati e si illustrano i metodi e modelli utilizzati per l'analisi. Il paragrafo 3 illustra i risultati di alcune valutazioni condotte analizzando le costanti armoniche, che costituiscono la componente astronomica della marea registrata nelle stazioni mareografiche presenti in laguna. Nel paragrafo 4 sono illustrate le analisi condotte sul segnale di marea direttamente registrato (somma di contributo astronomico e meteorologico) in alcune delle stazioni considerate e che confermano i riscontri ottenuti dall'analisi delle costanti armoniche. Nel paragrafo 5 si illustrano, infine, i risultati di un'indagine condotta con l'ausilio di un modello matematico bidimensionale, volta ad evidenziare alcune possibili conseguenze che le variazioni delle dinamiche mareali possono comportare sull'idrodinamica lagunare.
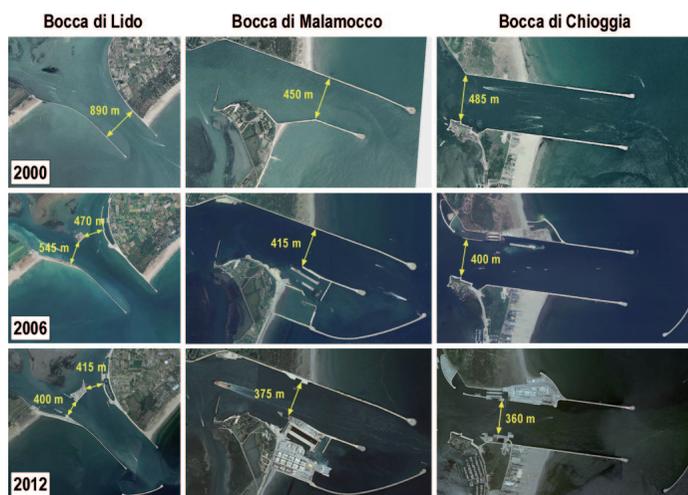
Fig. 1 - Restringimento della sezione delle bocche di porto dovuto alla realizzazione del Mo.S.E. (foto aeree georeferenziate tratte dal GeoPortale Nazionale del Ministero dell'Ambiente http://www.pcn.minambiente.it/GN/).

2. *Metodi e modelli*

Le valutazioni che si espongono nei paragrafi seguenti sono basate principalmente sull'analisi dell'ampio database di registrazioni mareografiche disponibile per la laguna di Venezia. Le prime osservazioni mareografiche sistematiche iniziarono nella città di Venezia già nel 1871 per opera del Genio Civile e dell'Istituto Geografico Militare. Successivamente, dopo la ricostituzione del Magistrato alle Acque (1907), venne istituito il Servizio Mareografico con il compito specifico di provvedere alla raccolta dei dati di marea in laguna e lungo il litorale Nord-Adriatico. Attualmente la maggior parte delle stazioni mareografiche lagunari è gestita da ISPRA, Servizio Laguna di Venezia, che dispone di una rete di 52 stazioni meteo-mareografiche distribuite all'interno del bacino lagunare e lungo il litorale. Alcune stazioni aggiuntive sono invece gestite dal Comune di Venezia, Centro Previsioni e Segnalazioni Maree.

Le registrazioni mareografiche, soggette a periodiche procedure di validazione e controllo, sono generalmente rese disponibili come serie temporali a passo temporale di 10 minuti e sensibilità di 1 cm.

Insieme a CNR-ISMAR e Comune di Venezia il Servizio Laguna di Venezia di ISPRA provvede anche all'elaborazione delle previsioni mareografiche per le stazioni più significative, sia nel breve termine, utilizzando modelli che forniscono la previsione con anticipo massimo di alcuni giorni, sia nel lungo termine, elaborando le tavole annuali di marea. In quest'ultimo caso la previsione riguarda la marea astronomica, ossia la componente dell'oscillazione mareale che è determinata dall'attrazione luni-solare, senza considerare le altre componenti che a questa si sovrappongono di giorno in giorno e che sono legate alle perturbazioni atmosferiche, alle oscillazioni del livello del mare Adriatico e alle variazioni di lungo periodo del livello medio del mare.

In questo studio sono considerati i dati mareografici del periodo 1994-2015 relativi a 21 stazioni distribuite in laguna e alle bocche di porto. Le stazioni selezionate sono quelle che dispongono delle più complete serie di dati validati ed in particolare dei dati relativi all'ultimo decennio, che è quello di interesse per la presente indagine. Sono stati considerati, inoltre, i dati della Piattaforma Oceanografica Acqua Alta, situata in Adriatico circa 15 km al largo del litorale veneziano, che sono stati resi disponibili dal Centro Maree del Comune di Venezia (Fig. 2).

Per il calcolo della marea astronomica è stato utilizzato il codice POLIFEMO [9] sviluppato presso ISMAR-CNR. Il programma elabora la serie dei livelli misurati per determinare le costanti armoniche che compongono la marea astronomica. Quest'ultima è espressa nella forma:

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{N} A_n \cos(\sigma_n t - \kappa_n)$$

in cui y (t) è l'altezza di marea al tempo t, A_n, σ_n, κ_n, sono, rispettivamente, l'ampiezza, la velocità angolare e il ritardo di fase della singola componente, A_0 è il valore medio del livello del mare. Nel calcolo, le velocità angolari σ_n, che dipendono dal periodo dei moti celesti, sono assunte come costanti note. L'ampiezza e la fase di ciascu-

na componente sono invece determinate dal programma elaborando le serie storiche delle altezze di marea e ricercando la migliore approssimazione tra le osservazioni e la funzione teorica mediante il metodo dei minimi quadrati [10].

Nel caso dell'Adriatico e della laguna di Venezia, sono sufficienti otto componenti armoniche per il calcolo pratico della marea astronomica con la precisione del centimetro. Le varie componenti, quattro con periodicità semidiurna e quattro con periodicità diurna, sono individuate con una sigla, legata alla loro origine astronomica: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, S1 [11].

Il ritardo di fase κ_n che, in generale, rappresenta il ritardo del massimo di marea rispetto al passaggio della luna, o dell'astro di riferimento, sul meridiano della località considerata, può essere calcolato secondo diverse convenzioni. Nel codice di calcolo utilizzato i ritardi di fase sono calcolati rispetto ad uno zero temporale fissato all'inizio dell'anno 1900, e sono poi corretti per essere allineati temporalmente con l'anno in corso. A tale riguardo, una caratteristica importante del codice POLIFEMO è la capacità di tener conto delle variazioni di lungo periodo delle costanti armoniche, legate alle periodicità del moto degli astri [10].

Le simulazioni idrodinamiche sono state condotte utilizzando il modello 2DEF, sviluppato dai ricercatori del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova [12] [13] [14]. Tale strumento modellistico costituisce il risultato di un'esperienza più che quarantennale nello studio dell'idrodinamica lagunare ed è tuttora impiegato e aggiornato dal medesimo gruppo di ricerca per condurre indagini sui processi idro-morfodinamici che caratterizzano la laguna di Venezia [15] [16] [17] [18].

Il modello è basato su di uno schema numerico uni-bidimensionale agli elementi finiti che risolve le equazioni differenziali del moto di una corrente a superficie libera su bassi fondali, formulate in modo da poter essere applicate anche ad aree parzialmente asciutte o che possono essere allagate o prosciugate durante l'evoluzione del fenomeno indagato [13] [14] [19].

Nel presente lavoro il modello idrodinamico è stato utilizzato per simulare la propagazione della marea all'interno della laguna considerando due diverse configurazioni delle tre bocche di porto: quel-
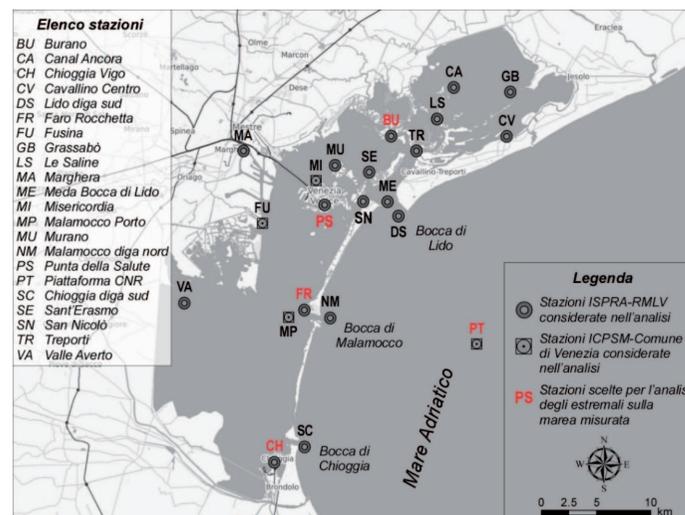
Fig. 2 - Mappa delle stazioni della rete mareografica di ISPRA e del Centro Maree del Comune di Venezia considerate nell'analisi.

la antecedente alla costruzione delle opere fisse del progetto Mo.S.E (scenario 2003) e quella successiva al completamento di tali opere (scenario 2012).

3. *Variazioni di ampiezza e ritardo della marea astronomica*

In condizioni atmosferiche non perturbate, quando la circolazione è influenzata solo dall'azione della marea, la Laguna di Venezia può essere considerata come composta da tre bacini che, dal punto di vista idrodinamico, sono quasi indipendenti. Ciascun bacino è collegato con il mare attraverso una delle tre bocche di porto (Lido, Malamocco e Chioggia) ed è separato dal bacino adiacente da una zona in cui le correnti sono quasi assenti e che può essere identificata come fascia di "partiacque". L'oscillazione della marea in Adriatico si propaga dalle bocche verso i margini di ciascun bacino subendo delle modificazioni

legate alla dinamica delle correnti nei canali e sui bassifondi lagunari. In particolare, negli specchi d'acqua interni, il segnale presenta una variazione di ampiezza (generalmente una riduzione) e un ritardo rispetto al segnale in mare aperto [1].

L'analisi della marea astronomica consente di valutare delle condizioni di riferimento non influenzate dagli effetti delle perturbazioni meteorologiche. Queste ultime, infatti, possono modificare in modo molto rilevante sia l'oscillazione del livello in Adriatico, sia i livelli sia le correnti lagunari, al punto che, in particolari condizioni di vento, la suddivisione tra i tre sotto-bacini può modificarsi sostanzialmente [5] [16]. Tuttavia le perturbazioni atmosferiche producono effetti che sono limitati nel tempo e che non modificano in modo rilevante le caratteristiche medie dell'idrodinamica lagunare nell'arco dell'anno, le quali sono sostanzialmente governate dalla forzante astronomica.

Per la valutazione delle variazioni di ampiezza e del ritardo di propagazione della marea che si sono verificati nel corso degli anni nelle diverse stazioni lagunari è perciò opportuno riferirsi alla marea astronomica [4] [6] [20].

A tale scopo sono state prese in considerazione 21 stazioni ubicate all'interno della laguna (Fig. 2). Si tratta di alcune delle stazioni della rete ISPRA, Servizio Laguna di Venezia, per le quali la serie dei livelli misurati è sostanzialmente completa nel periodo 1994-2015 e i dati che ne fanno parte sono stati sottoposti alle procedure di validazione e pubblicati [21]. La distribuzione delle stazioni considerate copre diffusamente la laguna settentrionale, a Nord della città di Venezia. Non sono molte, invece, le stazioni disponibili nel bacino centrale e nella laguna Sud. Purtroppo per le altre stazioni esistenti si è riscontrata una disponibilità di dati validati insufficiente per le elaborazioni, in particolare per gli ultimi anni, che sono quelli di maggiore interesse per la presente indagine.

Per ampliare ulteriormente la serie di dati e, soprattutto, a scopo di verifica, sono state considerate anche tre stazioni della rete del Centro Previsione e Segnalazione Maree del Comune di Venezia (Malamocco Porto, Misericordia e Fusina, Fig. 2) che dispongono anch'esse di registrazioni continue, limitate peraltro agli anni più recenti.

È stata, infine, considerata la serie dei livelli misurati presso la Piattaforma Acqua Alta del CNR-ISMAR, acquisita dal sensore del Centro Maree del Comune di Venezia e disponibile per tutto il periodo considerato.

Per ciascun anno di registrazione e per ciascuna stazione, sono state determinate, mediante il software POLIFEMO, le ampiezze e i ritardi di fase delle 7 componenti principali della marea astronomica, (M2, S2, N2, K2 con periodicità semidiurna e K1, O1, P1 con periodicità diurna). È stato trascurato l'effetto dell'ottava componente diurna S1 che, in termini pratici, ha una modestissima influenza sulla determinazione dell'altezza di marea e le cui variazioni di anno in anno sono minime.

La valutazione dei valori "medi annuali" dell'ampiezza e del ritardo di fase di ciascuna stazione è stata ottenuta con un procedimento analogo a quello adottato in precedenti indagini [4] [6] [7]. L'ampiezza complessiva è stata, cioè, ottenuta sommando le ampiezze delle singole componenti. Diversamente dagli studi citati, in questo caso nella somma sono state considerate tutte e 7 le componenti astronomiche e non solo quelle più importanti M2 e S2.

Per quanto riguarda il ritardo, in analogia con i criteri seguiti nei lavori citati, sono stati calcolati i singoli ritardi di fase, in gradi, delle 7 componenti. Essendo note le velocità angolari di ciascuna componente, i ritardi di fase sono stati convertiti da gradi in minuti e trasformati in ritardi relativi operandone la differenza rispetto ai corrispondenti valori determinati per la stazione in mare aperto (Piattaforma). Infine, il ritardo complessivo per la generica stazione in un certo anno è stato ottenuto calcolando la media dei ritardi di ogni componente pesata rispetto all'ampiezza di ciascuna di esse.

I risultati ottenuti, in termini di ampiezza complessiva e ritardo complessivo sono riportati rispettivamente in Tab. I e Tab. II, e rappresentati graficamente in Fig. 3 e Fig. 4.

Per quanto riguarda l'ampiezza, le curve di Fig. 3 mettono in evidenza una tendenza che, nonostante le oscillazioni che si riscontrano tra anno e anno, sembra essere abbastanza ben delineata. Si osserva infatti che, mentre nel periodo 1994-2004 l'ampiezza si è mantenuta sostanzialmente stabile o ha seguito una leggera crescita, negli anni successivi al 2004 in quasi tutte le stazioni essa si è progressivamente ridotta. Si osserva che da questa tendenza si discostano, oltre che alcune stazioni periferiche (in particolare Cavallino Centro), tutte le stazioni esterne alla

Tab. I - Variazione dell'ampiezza complessiva della marea astronomica tra il 1994 e il 2015.

Somma delle semi-ampiezze (cm) delle componenti astronomiche in alcune stazioni della Laguna di Venezia dal 1994 al 2015

Anno	BU	CH	CN	CV	DS	FR	FU	GB	LS	MA	ME	MI	MP	MU	NM	PS	PT	SC	SE	SN	TR	VA
1994	66.7	73.3		47.9	75.1	75.8		59.0	58.9	77.8	74.9				76.1	76.3	74.2	74.6		74.9	66.8	
1995	67.3	73.4		48.3	74.7	74.4	73.7	58.9		74.0	73.7			76.9	76.9	76.3	74.5	74.0		74.8	67.5	74.6
1996	65.4	73.2		48.8	74.1	75.0	78.3	59.4		78.8	73.2			74.3	75.8	76.6	74.0	73.9	72.6	73.9	66.8	75.1
1997	67.5	73.9		49.5	76.2	76.3	79.2	59.2		80.4	76.7			78.5	77.8	78.1	75.9	76.1		75.4	67.6	75.8
1998	67.4	73.1		48.4	74.6	75.4		57.9		77.7	73.8				76.4	76.6	75.1	74.5		75.5	66.9	
1999	67.6	72.5		48.1	74.7	75.7	78.0	58.2	58.9	77.6	73.8			74.8	76.5	76.2	74.7	74.7	73.0	75.2	67.1	74.4
2000	65.7	71.5		47.5	74.8		76.3	57.7	58.4	75.5	71.9			73.4	74.1	74.9	72.1	73.0	71.9	72.9		73.3
2001	68.7	73.9		50.7	77.1	74.8	79.1	60.7	61.5	78.0				75.8	77.6	77.4	75.4	75.2	74.3	75.5	67.5	75.5
2002	67.2	73.3		51.3	75.7	74.9	77.9	60.7	60.7	77.6				74.9	75.2	77.3	74.3	73.9	72.9			75.3
2003		73.9		52.5	76.2	75.0	78.7	60.0	60.7	78.7		75.4		75.6	76.1	78.0	74.7	74.3	73.5	75.4	67.1	75.6
2004	68.5	74.3	61.5	53.5	76.9	76.8	79.4	61.0	61.5	78.9	74.5	75.1		75.2	76.1	77.7	75.2	74.9	73.2	75.1		76.8
2005	65.4	71.7	58.3	50.8	75.2	73.5	77.2	57.4	58.9	77.5	73.2	72.0	74.2	72.0	75.1	75.9	73.9	73.4	72.3	73.3		74.3
2006	64.9	71.5		48.8	75.3	73.0	77.6	57.2	58.4	77.0		72.3	74.0	71.0	75.0	76.0	73.8	72.4	72.4	73.2		73.6
2007	64.7	71.7	58.5	49.2	76.2	73.6	77.8	57.1	58.3	77.5	74.0	72.3	74.4	71.5	74.3	75.2	74.6	74.5	72.0	73.5	62.1	73.4
2008	63.1	70.6	57.1	48.4	75.2	72.2	75.5	56.5	56.8	75.6	73.3	70.2	72.4	68.4	75.1	73.4	73.8	74.0	69.9	71.1	60.3	71.5
2009	64.1	71.3	58.9	51.2	77.4	72.0	75.7	57.9	58.0	75.7	73.7	70.5	72.3	70.4	75.3	73.2	74.7	74.4	69.8	71.6	61.4	71.9
2010	62.8	69.5	57.0	50.2	74.9	69.5		57.0	56.8	73.3	72.4	68.9	69.7	68.6	74.7	71.1	73.6	73.2	67.3	69.5	60.0	70.9
2011	63.6	70.7	56.8	48.3	75.5	70.7		55.9	56.5	75.0		70.7	71.0	69.8	76.2	72.6	74.7	74.4	69.7	71.1	60.5	72.1
2012	62.3	69.4	56.3	47.9	73.0	69.6		56.6	56.0	73.9	73.3	69.7	70.0	68.7	74.5	71.7	73.4	73.1	68.0	69.4	58.9	70.7
2013	62.4	69.2	56.9	48.4	73.5	69.2		57.2	56.2	73.3	73.2	69.3	69.8	68.5	75.0	71.2	73.5	73.4	67.7	70.9	59.4	70.9
2014	62.4	69.6	56.5	48.1	74.3	68.7		55.8	56.0	73.1	73.2	69.0	70.4	68.2	74.4	71.5	73.1	73.0	67.3	69.5	59.2	69.6
2015	62.7	71.0	56.5	48.6	75.3	70.4		56.7	56.4	75.2	74.3		71.0	70.1	75.9	72.8	74.8	74.1	69.1	71.2	58.8	71.3
media 03-05	66.9	73.3	59.9	52.3	76.1	75.1	78.4	59.5	60.4	78.4	73.9	74.2	74.2	74.3	75.8	77.2	74.6	74.2	73.0	74.6	67.1	75.6
media 13-15	62.5	69.9	56.6	48.4	74.4	69.4	-	56.6	56.2	73.9	73.6	69.1	70.4	68.9	75.1	71.8	73.8	73.5	68.0	70.5	59.1	70.6
differenza %	-6.7	-4.6	-5.5	-7.4	-2.3	-7.5	-	-4.9	-7.0	-5.8	-0.5	-6.8	-5.1	-7.2	-0.9	-7.0	-1.1	-0.9	-6.9	-5.5	-11.8	-6.6

Codice stazione: BU: Burano, CH: Chioggia Vigo, CN: Canal Ancora, CV: Cavallino Centro, DS: Diga sud Lido, FR: Faro Rocchetta, FU: Fusina, GB: Grassabò LS: Le Saline, MA: Marghera, ME: Meda bocca di Lido, MI: Misericordia, MP: Malamocco Porto, MU: Murano, NM: Diga nord Malamocco, PS: Punta della Salute PT: Piattaforma CNR, SC: Diga sud Chioggia, SE: Sant'Erasmo, SN: San Nicolò, TR: Treporti, VA: Valle Averto.

Note: tutti i dati sono stati messi a disposizione da ISPRA - Servizio Laguna di Venezia ad eccezione di quelli evidenziati in blu, forniti dal CPSM - Comune di Venezia

laguna, e cioè la stazione di Piattaforma e le stazioni ubicate alle bocche di porto (Lido Diga Sud, Malamocco Diga Nord, Chioggia Diga Sud, Meda bocca di Lido) per le quali, anche per gli anni successivi al 2004, le ampiezze si mantengono sostanzialmente costanti.

I dati riportati in Tab. 1 mostrano che, mediamente, le variazioni dell'ampiezza complessiva che si riscontrano nel decennio 2004-2014 nelle stazioni interne alla laguna sono dell'ordine del 5÷7%. Questo risultato si ottiene confrontando la media dei valori del triennio 2003-2005 con quella del triennio 2013-2015.

Anche i ritardi complessivi mostrano un andamento che si differenzia in modo marcato se si considerano il periodo antecedente al 2004 e quello successivo. Si osserva infatti che, dopo il 2004, i ritardi tendono in modo generalizzato ad aumentare (Fig. 4). Come nel caso delle ampiezze, questa tendenza è comune a tutte le stazioni lagunari, ma non riguarda, o riguarda in misura molto minore, le stazioni poste alle bocche di porto. Mediamente, dopo il 2004, nelle stazioni interne
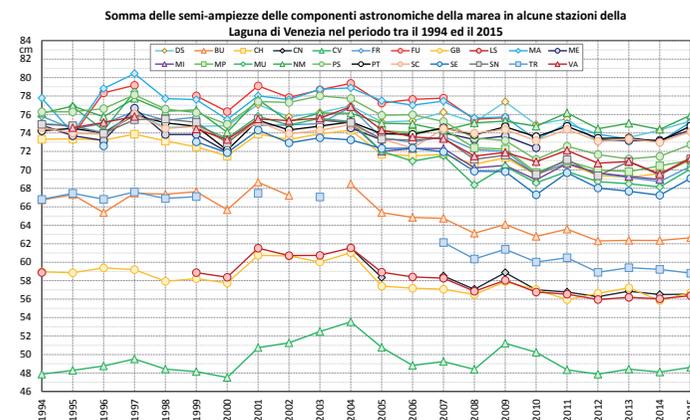
Fig. 3 - Variazione dell'ampiezza complessiva della marea astronomica tra il 1994 e il 2015.

alla laguna il ritardo complessivo si incrementa in misura variabile tra 10 e 15 minuti, ma vi sono alcune stazioni per cui il ritardo stesso si incrementa di oltre 20 minuti (Tab. II).

Si tratta di variazioni non trascurabili che, essendo comuni alla maggior parte delle stazioni situate all'interno della laguna, ma non a quelle situate in mare, segnalano che nell'ultimo decennio vi sono stati cambiamenti in grado di influenzare la propagazione della marea dal mare verso l'interno.

Queste variazioni sembrano riconducibili ai restringimenti operati sulle sezioni delle bocche di porto dovuti alla realizzazione delle opere di supporto del Mo.S.E. (Fig. 1) iniziate nel 2003. I lavori per la realizzazione dell'opera nel suo complesso sono attualmente ancora in corso, tuttavia le cosiddette opere fisse che hanno modificato la configurazione delle bocche e che possono avere indotto un impatto sulle correnti di marea sono sostanzialmente concluse dal 2011. Tali opere comprendono le dighe curvilinee al largo delle bocche (le cosiddette "lunate"), i rialzi del fondale, le spalle dei varchi presidiati dalle paratoie mobili, le conche di navigazione, i porti rifugio (Fig. 1). Si può presumere che il restringimento delle bocche lagunari e la modifica

Tab. II - Variazione del ritardo complessivo di propagazione della marea astronomica tra il 1994 e il 2015.

Ritardo di propagazione (minuti) delle componenti astronomiche in alcune stazioni della Laguna di Venezia rispetto a Piattaforma CNR

Anno	BU	CH	CN	CV	DS	FR	FU	GB	LS	MA	ME	MI	MP	MU	NM	PS	PT	SC	SE	SN	TR	VA
1994	78.3	21.1		185.1	0.2	15.0		165.8	103.9	72.5	7.1				*10.8*	44.6	*0.0*	*2.4*		29.2	50.4	
1995	74.9	22.4		187.5	1.3	25.9	*40.7*	160.4		66.2	12.8			55.1	*2.9*	48.4	*0.0*	*3.9*		30.2	50.4	92.4
1996	81.3	21.4		193.5	-0.2	20.9	*60.6*	164.0		66.0	14.2			65.2	*4.2*	49.6	*0.0*	*-0.9*	46.4	32.7	51.8	97.3
1997	84.7	24.1		189.8	-1.7	20.0	*43.4*	174.2		56.1	5.2			58.4	*-1.2*	45.4	*0.0*	*-2.0*		28.0	47.4	98.5
1998	85.4	24.9		189.1	3.0	20.0		167.5		62.1	13.1				*8.1*	53.8	*0.0*	*3.1*		29.7	52.4	
1999	86.1	26.3		196.6	4.7	19.0	*56.8*	167.2	124.5	63.2	10.3			67.3	*4.2*	51.3	*0.0*	*0.0*	47.0	28.7	54.3	94.7
2000	80.9	21.1		191.3	-4.0		*53.0*	160.5	115.0	57.7	5.3			62.9	-9.9	43.4	*0.0*	-5.4	41.7	26.7		86.5
2001	88.2	27.1		195.2	3.5	12.0	60.4	162.0	122.1	62.4				71.2	*5.4*	51.1	*0.0*	2.9	49.6	36.1	58.6	94.7
2002	78.3	26.5		185.4	-2.9	24.9	58.2	163.0	118.8	58.8				67.1	0.9	50.1	*0.0*	0.6	48.1			89.9
2003		19.9		173.8	-9.9	20.7	48.7	154.5	112.4	52.8		*59.2*		69.5	-6.1	41.8	*0.0*	-7.0	39.2	26.4	50.6	84.4
2004	76.9	27.3	145.8	183.5	-3.7	22.1	51.8	159.1	120.8	69.1	1.4	*64.8*		73.5	-1.5	46.9	*0.0*	1.2	52.5	28.2		84.3
2005	84.1	32.5	154.1	183.4	4.4	28.5	53.5	160.8	114.7	66.2	7.3	*65.6*	*31.9*	72.5	-0.4	51.0	*0.0*	4.9	47.7	30.3		84.7
2006	88.0	32.0		187.9	-0.8	28.3	60.1	161.2	123.1	56.9		*68.8*	*36.5*	71.1	*-0.5*	47.5	*0.0*	4.2	47.1	29.0		91.0
2007	93.7	36.9	153.6	193.7	5.2	35.3	65.4	172.1	126.1	74.0	16.1	*74.4*	*41.5*	83.6	5.7	56.5	*0.0*	6.3	40.6	36.4	70.0	101.3
2008	94.8	37.6	155.3	194.5	6.2	37.0	67.4	169.8	133.1	73.5	13.7	*75.6*	*44.3*	84.3	2.4	56.3	*0.0*	5.9	56.7	33.2	72.7	108.1
2009	91.6	38.0	151.7	193.3	4.9	38.6	74.7	163.8	132.6	72.0	11.6	*76.3*	*48.6*	81.2	2.5	57.1	*0.0*	6.3	57.2	39.0	74.0	100.5
2010	90.7	37.9	161.0	195.2	0.3	41.8		162.7	134.2	72.1	10.9	*76.5*	*54.5*	80.4	-3.3	57.1	*0.0*	2.8	62.3	37.2	73.0	99.4
2011	94.7	38.7	162.1	208.2	7.1	45.2		173.4	135.7	78.5		*79.0*	*55.4*	85.7	5.3	60.6	*0.0*	7.9	61.8	38.7	69.9	109.6
2012	90.3	38.9	163.9	208.3	11.9	46.1		172.7	136.4	78.2	12.1	*77.6*	*53.5*	86.6	13.0	58.9	*0.0*	16.2	58.3	44.4	75.9	112.0
2013	95.1	36.9	159.0	202.5	8.8	44.1		170.2	134.5	76.9	10.1	*77.8*	*51.1*	83.9	5.3	60.3	*0.0*	5.6	58.7	45.4	79.5	112.0
2014	90.4	32.5	161.1	201.1	-0.6	38.7		164.6	132.3	75.0	6.4	*73.8*	*44.1*	78.3	1.0	56.2	*0.0*	2.1	56.8	40.7	74.8	108.4
2015	90.3	34.1	160.8	202.8	2.6	41.2		174.9	135.0	76.4	10.5		*48.4*	84.8	0.7	58.7	*0.0*	2.1	58.3	43.4	78.4	109.1
media 03-05	80.5	26.6	149.9	180.2	-3.1	23.8	51.3	158.1	116.0	62.7	4.3	63.2	31.9	71.8	-2.7	46.6	0.0	-0.3	46.4	28.3	50.6	84.5
media 13-15	91.9	34.5	160.3	202.2	3.6	41.4	-	169.9	133.9	76.1	9.0	75.8	47.9	82.3	2.3	58.4	0.0	3.3	57.9	43.2	77.5	109.8
differenza	11.5	7.9	10.4	21.9	6.7	17.6	-	11.8	18.0	13.4	4.7	12.6	16.0	10.5	5.0	11.8	0.0	3.6	11.5	14.9	27.0	25.4

Codice stazione: BU: Burano, CH: Chioggia Vigo, CN: Canal Ancora, CV: Cavallino Centro, DS: Diga sud Lido, FR: Faro Rocchetta, FU: Fusina, GB: Grassabò LS: Le Saline, MA: Marghera, ME: Meda bocca di Lido, MI: Misericordia, MP: Malamocco Porto, MU: Murano, NM: Diga nord Malamocco, PS: Punta della Salute PT: Piattaforma CNR, SC: Diga sud Chioggia, SE: Sant'Erasmo, SN: San Nicolò, TR: Treporti, VA: Valle Averto.
Note: tutti i dati sono stati messi a disposizione da ISPRA - Servizio Laguna di Venezia ad eccezione di quelli evidenziati in blu, forniti dal CPSM - Comune di Venezia

della loro configurazione geometrica abbia provocato un incremento delle resistenze idrauliche che le correnti di marea incontrano nel superamento delle bocche stesse e, conseguentemente, una modificazione del segnale di marea che si traduce proprio in una riduzione di ampiezza e un incremento del ritardo di fase [22] [23].

Come si è detto, le stazioni mareografiche prese in esame non sono distribuite in modo omogeneo in tutta la laguna per cui non è possibile, in base ai dati disponibili, differenziare con la dovuta precisione gli effetti segnalati nei diversi ambiti lagunari. Tuttavia i risultati ottenuti suggeriscono che le maggiori variazioni, sia in termini di ampiezza che di ritardo di fase, si siano verificate nel Bacino di Malamocco. Questo appare abbastanza evidente se si osservano le variazioni relative alla stazione ISPRA di Faro Rocchetta (FR), che si colloca all'interno della Bocca di Malamocco, per la quale le variazioni osservate sono le massime in assoluto. In questo caso, l'affidabilità del risultato ottenuto è implicitamente confermata dal confronto con la stazione
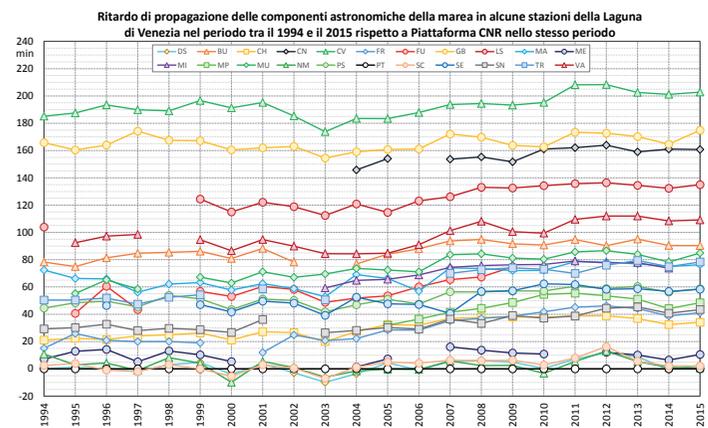
Fig. 4 - Variazione del ritardo complessivo di propagazione della marea astronomica tra il 1994 e il 2015.

di Malamocco Porto (MP), gestita dal Comune di Venezia. Anche se la stazione del Comune dispone di dati solo per un periodo limitato, per tale periodo i risultati ottenuti per le due stazioni, che si collocano a breve distanza l'una dall'altra, sono praticamente coincidenti.

4. *Variazioni di ampiezza e ritardo della marea reale*

Le valutazioni esposte nel paragrafo precedente hanno portato a stimare le variazioni di ampiezza e ritardo di fase della marea per via indiretta, combinando opportunamente i valori che definiscono le singole componenti armoniche che costituiscono la marea astronomica. Si è perciò ritenuto opportuno completare le valutazioni suesposte mediante il calcolo diretto dell'ampiezza e del ritardo di fase in base all'analisi del segnale completo della marea, in cui sono stati preliminarmente identificati i colmi e i cavi delle oscillazioni (i cosiddetti "estremali"). Questo al fine, da una parte, di verificare il risultato ottenuto con il metodo indiretto, dall'altra di ottenere delle valutazioni su

Tab. III - Ampiezza e ritardo di fase ottenuti analizzando gli estremali relativi alla sola componente astronomica e al segnale di marea completo in alcune stazioni di Fig. 2.

	Ampiezza dell'oscillazione di marea (cm)										Ritardo rispetto al mare (minuti)							
	marea astronomica					*marea reale*					*marea astronomica*				*marea reale*			
Anno	**PT**	**FR**	**BU**	**CH**	**PS**	**PT**	**FR**	**BU**	**CH**	**PS**	**FR**	**BU**	**CH**	**PS**	**FR**	**BU**	**CH**	**PS**
1994	56.2	56.9	50.5	55.7	58.7	55.4	57.6	52.1	56.3	60.5	18.8	75.4	20.7	40.6	25.9	78.1	25.4	43.2
1995	56.0	56.6	50.8	55.6	58.8	55.6	57.2	52.3	57.0	60.9	24.4	74.6	21.4	43.4	28.7	78.3	24.9	46.8
1996	56.3	56.6	49.8	55.8	59.0	55.6	58.7	52.4	57.4	61.2	23.3	79.5	21.1	45.7	27.0	77.6	24.3	48.5
1997	56.6	56.8	51.3	56.1	59.2	56.1	58.4	53.7	58.0	61.5	21.5	77.4	19.4	40.5	25.0	77.4	23.3	44.3
1998	56.2	56.5	51.6	55.5	58.9	56.5	58.1	53.5	56.5	60.8	21.2	81.1	22.6	48.9	27.7	84.8	27.7	49.5
1999	56.6	56.9	51.7	55.7	59.0	56.6	58.4	54.5	57.4	61.2	24.3	81.6	24.1	46.8	29.8	84.6	28.1	52.4
2000	55.8		50.9	55.5	58.7	56.2		53.6	57.0	61.0		77.5	20.7	39.7		80.9	26.3	46.1
2001	57.0	56.1	52.4	56.1	59.6	57.5	57.0	55.0	57.7	61.7	14.9	83.3	25.4	45.5	29.8	86.8	29.5	51.6
2002	56.1	56.5	51.0	55.6	59.1	56.4	57.5	53.8	56.9	61.0	26.8	73.7	25.4	46.3	30.8	75.2	28.6	51.2
2003	56.3	56.2		56.0	59.4	56.6	58.0		57.7	61.5	22.9		17.5	37.5	28.5		23.5	43.1
2004	56.5	57.6	51.7	55.9	59.3	57.5	59.6	54.9	58.1	61.7	27.7	73.6	27.6	43.1	32.8	73.6	30.7	48.9
2005	56.2	55.5	49.8	54.9	58.0	57.0	57.7	53.1	57.1	60.8	31.2	81.4	30.4	49.5	34.4	83.7	33.2	49.7
2006	56.2	54.9	49.3	54.4	58.2	56.3	56.8	52.0	55.5	60.0	30.2	84.6	31.1	44.6	34.7	86.9	33.8	51.2
2007	56.3	55.4	48.9	54.4	57.6	56.7	56.9	51.8	55.9	59.7	37.4	90.6	36.4	54.1	40.0	94.4	39.6	56.5
2008	55.8	54.3	47.6	53.4	56.0	56.7	56.4	50.9	55.3	58.5	39.8	94.4	38.1	55.6	40.6	97.2	40.2	58.5
2009	56.0	53.7	48.1	53.6	55.4	56.9	56.1	51.4	55.8	58.0	42.2	91.3	38.8	55.3	42.0	91.2	39.9	58.7
2010	56.1	52.6	47.7	53.0	54.7	56.6	55.0	50.7	55.1	57.3	45.6	89.1	38.9	55.2	44.5	89.0	40.1	58.4
2011	56.5	53.0	48.0	53.3	55.3	56.9	55.3	51.0	55.2	57.6	48.2	92.2	39.0	57.7	47.9	93.0	41.5	61.9
2012	55.6	52.0	46.8	52.6	54.6	56.3	54.6	50.3	54.9	57.2	48.7	86.9	38.8	55.9	47.9	88.4	40.6	60.0
2013	55.7	51.8	47.2	52.5	54.6	56.6	54.4	50.4	54.6	57.2	46.1	90.4	35.4	55.9	46.7	93.2	38.1	60.6
2014	55.5	51.4	46.9	52.6	54.5	56.4	53.5	49.8	54.3	56.8	41.7	87.2	32.2	53.7	42.1	89.4	36.0	57.7
2015	56.6	52.3	47.2	53.7	55.6	57.1	54.7	50.4	55.3	57.8	44.6	85.6	33.2	55.2	44.4	88.3	36.5	59.2
media 03-05	*56.4*	*56.5*	*50.8*	*55.6*	*58.9*	*57.0*	*58.4*	*54.0*	*57.6*	*61.4*	*27.3*	*77.5*	*25.2*	*43.4*	*31.9*	*78.7*	*29.1*	*47.2*
media 13-15	*55.9*	*51.9*	*47.1*	*52.9*	*54.9*	*56.7*	*54.2*	*50.2*	*54.8*	*57.3*	*44.1*	*87.7*	*33.6*	*54.9*	*44.4*	*90.3*	*36.9*	*59.2*
differenza	***-0.5***	***-4.6***	***-3.7***	***-2.7***	***-4.0***	***-0.4***	***-4.3***	***-3.8***	***-2.9***	***-4.1***	***16.8***	***10.2***	***8.4***	***11.6***	***12.5***	***11.6***	***7.7***	***11.9***

ampiezze e ritardo di fase quantitativamente congruenti con le misure mareografiche che normalmente sono effettuate in laguna.

Una prima elaborazione è stata effettuata calcolando, per ciascun anno e per ciascuna stazione, l'andamento della marea astronomica sulla base delle componenti armoniche elaborate con il software POLIFEMO e utilizzate nel paragrafo precedente. Il segnale è stato elaborato selezionando tutti i massimi e i minimi, ed è stata calcolata l'ampiezza media annuale dell'oscillazione di marea come differenza tra la media dei massimi e la media dei minimi di ciascun anno. Il ritardo di fase rispetto alla Piattaforma CNR è stato calcolato individuando, per ogni estremale (massimo o minimo) della generica stazione, il corrispondente estremale registrato alla stazione Piattaforma e calcolando il ritardo da quest'ultimo in minuti. Per ciascuna stazione, l'ampiezza media (A_{med}) e il ritardo di fase medio (R_{med}) sono stati, in definitiva, ottenuti utilizzando le formule seguenti:
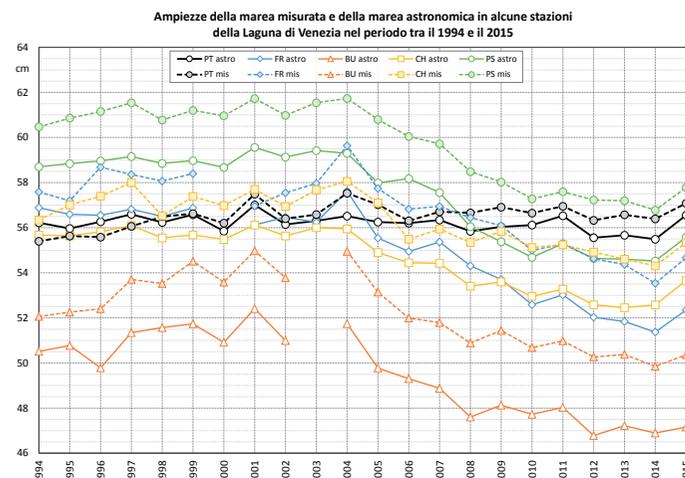
Fig. 5 - Variazione di ampiezza della marea ottenuta analizzando gli estremali relativi alla sola componente astronomica (linea continua) e il segnale di marea completo (linea tratteggiata) in alcune stazioni di Fig. 2.
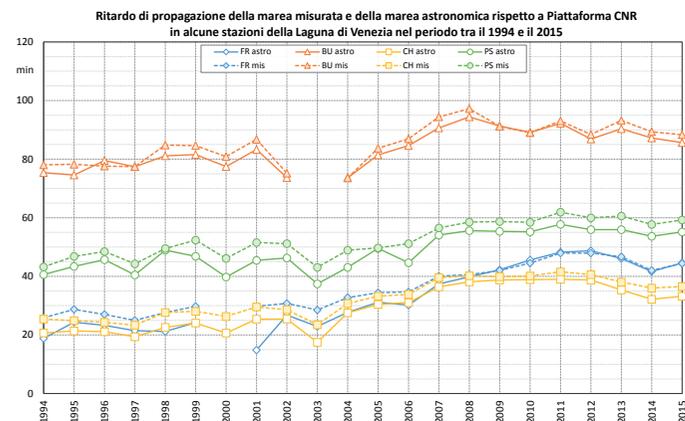
Fig. 6 - Variazione dei ritardi di propagazione della marea ottenuta analizzando gli estremali relativi alla sola componente astronomica (linea continua) e il segnale di marea completo (linea tratteggiata) in alcune stazioni di Fig. 2.

$$A_{med} = \frac{1}{N_{max}} \sum_{i=1}^{N_{max}} H_i^{max} - \frac{1}{N_{min}} \sum_{j=1}^{N_{min}} H_j^{min}$$

$$R_{med} = \frac{1}{N_{max} + N_{min}} \left(\sum_{i=1}^{N_{max}} \left(T_i^{max} - T_{i_PT}^{max} \right) + \sum_{j=1}^{N_{min}} \left(T_i^{min} - T_{i_PT}^{min} \right) \right)$$

in cui N_{max} e N_{min} rappresentano il numero di estremali positivi (massimi di marea) e negativi (minimi di marea), H^{max} e H^{min} indicano il valore del livello in corrispondenza del singolo massimo e minimo di marea, mentre $(T^{max}–T^{max}{}_p)$ e $(T^{min}–T^{min}{}_p)$ individuano il ritardo con cui il singolo estremale si presenta nella singola stazione rispetto a quando si presenta nella Piattaforma CNR.

Una seconda elaborazione è stata effettuata analizzando direttamente i dati misurati, ovvero senza passare attraverso la ricostruzione della componente astronomica della marea ma considerando il segnale completo (somma di contributo astronomico e meteorologico) così come registrato nelle singole stazioni.

Nello specifico, i dati misurati ad intervalli di 10 minuti (o interpolati per riportarli a tale cadenza nei pochi casi in cui gli intervalli di campionamento risultavano superiori) sono stati ri-elaborati applicando un filtro a media mobile su 5 dati, in modo da regolarizzare l'andamento dei dati stessi che, come si è detto, sono forniti con una sensibilità pari a 1 cm. L'individuazione degli estremali dei dati misurati è stata effettuata considerando, per ciascuna stazione, tutti i massimi e i minimi ricavati dalla marea astronomica e individuando, per ciascuno di essi, il valore misurato massimo o minimo più prossimo, considerando convenzionalmente un intorno temporale massimo pari a 2 ore. Una volta individuati gli estremali, l'ampiezza e il ritardo di fase sono stati calcolati con le medesime formule utilizzate per le maree astronomiche.

I grafici riportati in Fig. 5 e Fig. 6 rappresentano i risultati ottenuti dall'analisi degli estremali considerando sia la sola componente astronomica (linee continue) sia la marea reale (contenente anche il contributo meteorologico – linee tratteggiate) per le stazioni mareografiche di Chioggia Vigo, Faro Rocchetta, Punta della Salute, Burano, selezionate tra quelle disponibili in modo da ottenere delle valutazioni distribuite all'interno di tutto il bacino lagunare.

Dai grafici si evince come le variazioni che caratterizzano sia l'ampiezza sia il ritardo di fase siano del tutto in linea con quelle ottenute, sulla base delle sole costanti armoniche, nel paragrafo precedente. Se si confronta, infatti, la media delle ampiezze del periodo 2003-2005 con quella del periodo 2013-2015 si ottiene che, per le quattro stazioni considerate, l'ampiezza di marea si è ridotta negli ultimi anni di circa 3÷4 cm. Le riduzioni maggiori si ottengono per la stazione di Faro Rocchetta e per quella di Punta della Salute. Leggermente inferiori sono le riduzioni valutate per le stazioni di Burano e di Chioggia. Per quanto riguarda il ritardo di fase rispetto al mare, i risultati ottenuti indicano che questo è aumentato di circa 15 minuti per Faro Rocchetta, e di circa 10 minuti per le altre stazioni. Appare confermato, quindi, che gli effetti massimi indotti dagli interventi alle bocche di porto hanno riguardato il bacino di Malamocco.

L'accordo evidenziato tra i risultati ottenuti analizzando le singole componenti armoniche (par. 3) e quelli ottenuti analizzando la serie degli estremali (sia della sola componente astronomica che dei segnali di marea completi – par. 4), al di là di essere una conferma della validità dei risultati ottenuti, ribadisce l'attendibilità del primo tipo di approccio che, oltretutto, è operativamente molto meno oneroso.

5. *Effetti sulla circolazione lagunare*

A completamento dell'indagine, sono state effettuate delle simulazioni modellistiche per analizzare gli effetti delle variazioni della configurazione delle bocche sull'idrodinamica lagunare nel suo complesso, utilizzando il modello idrodinamico uni-bidimensionale della laguna di Venezia messo a punto dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, descritto nel par. 2.

Il modello è stato utilizzato considerando due diverse schematizzazioni della laguna: la prima (2003) che riproduce le bocche di porto nella loro configurazione antecedente l'inizio dei lavori del Mo.S.E. (Fig. 7); la seconda (2012) che riproduce invece la configurazione delle bocche stesse ad opere ultimate. Il reticolo di calcolo relativo alla

seconda configurazione differisce dalla configurazione "ante operam" solo per la conformazione dei contorni geometrici delle bocche di porto e per le relative quote batimetriche, che sono state dedotte dagli elaborati progettuali. In entrambi i casi, le quote batimetriche interne alla laguna sono state assegnate sulla base del più recente rilievo completo della laguna disponibile ([16] – Fig. 7).

La capacità del modello di riprodurre il comportamento idrodinamico della laguna, già ampiamente testata in applicazioni precedenti [15] [16], è stata ulteriormente verificata simulando due eventi reali (uno del 2003 e uno del 2012) considerando le due diverse configurazioni e confrontando i risultati del calcolo con le registrazioni di marea fatte nelle stazioni della rete di monitoraggio ISPRA. I risultati ottenuti hanno mostrato un'ottima corrispondenza tra le misure e il calcolo confermando l'accuratezza del modello nella simulazione della propagazione della marea all'interno della laguna veneziana.

Successivamente, sono state effettuate ulteriori simulazioni con entrambe le schematizzazioni (2003 e 2012) imponendo come condizione al contorno in mare la medesima marea (una marea astronomica sizigiale della durata di alcuni giorni).

Il confronto tra i risultati ottenuti tra i due scenari si è dimostrato in linea con i risultati ottenuti nelle precedenti analisi. Il modello segnala infatti che la modifica della configurazione delle bocche per effetto delle opere fisse del Mo.S.E. ha prodotto complessivamente una maggiore attenuazione dell'ampiezza di marea all'interno della laguna e un incremento dei ritardi di fase. L'osservazione dei dati forniti dal modello nell'intero dominio di calcolo ha permesso di evidenziare come queste variazioni non sono distribuite uniformemente su tutta la laguna ma risultano concentrate maggiormente nel bacino centrale, dominato dalla Bocca di Malamocco, e nella Laguna Nord, alimentata dal canale di Treporti.

Il modello mette in evidenza che la variazione della configurazione geometrica delle bocche, ed in particolare il restringimento della sezione, porta ad un incremento delle velocità massime della corrente che attraversa le bocche stesse. Ciò accade in particolare per la Bocca di Malamocco (Fig. 8) che è quella, tra le tre bocche, dove le velocità della corrente sono più elevate.

L'incremento locale della velocità della corrente giustifica le varia-
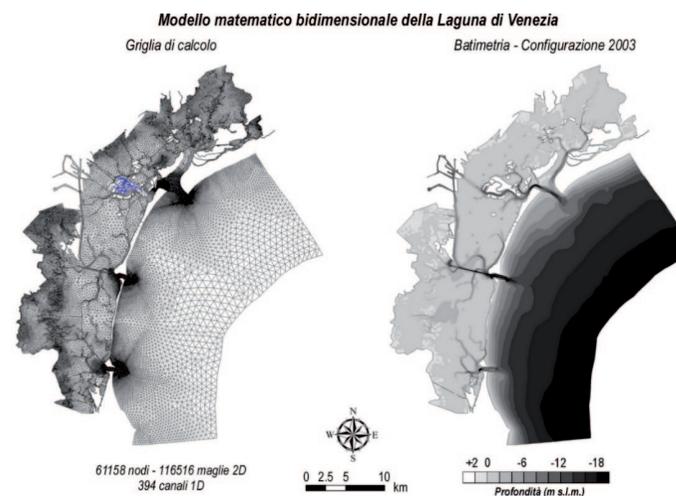
Fig. 7 - Reticolo di calcolo e schematizzazione batimetrica adottata nel modello uni-bidimensionale della laguna di Venezia.

zioni che si osservano sulle oscillazioni della marea in laguna perché, a velocità maggiori, corrispondono maggiori azioni dissipative. Queste si traducono in un incremento delle resistenze idrauliche che la marea incontra nel superamento della bocca di porto e, quindi, in uno smorzamento dell'oscillazione mareale all'interno del bacino [22] [23].

L'impiego del modello è risultato particolarmente utile per l'analisi degli spostamenti subiti dalle zone di "partiacque", che separano i bacini di influenza delle singole bocche lagunari. Le linee di "partiacque" sono state individuate mediante un'analisi sui campi di velocità sia in fase di marea crescente (flusso) che in fase di marea calante (riflusso), delimitando i sottobacini afferenti a ciascuna bocca sulla base della distribuzione delle linee di corrente. Non essendo il processo perfettamente simmetrico, le linee individuate nelle due fasi di marea (flusso e riflusso) non risultano coincidenti e portano a materializzare delle "fasce di partiacque", mediamente riferibili all'intero ciclo di marea.
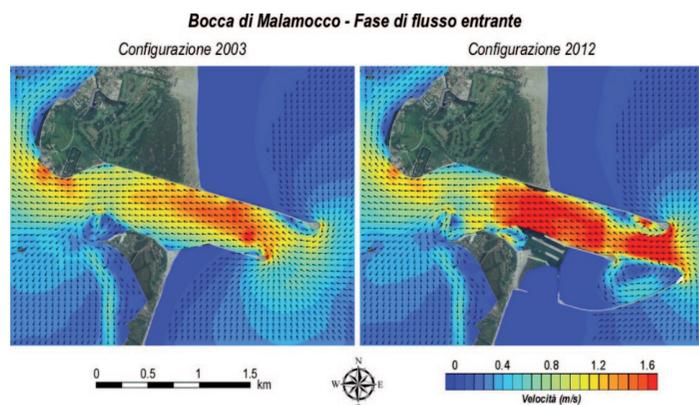
Fig. 8 - Bocca di Malamocco. Confronto tra i campi di velocità in flusso entrante calcolati con il modello bidimensionale considerando le due configurazioni analizzate: 2003 e 2012.

I risultati modellistici (Fig. 9) mostrano che la posizione dei limiti delle "fasce di partiacque", identificata per la configurazione successiva agli interventi alle bocche (linee verdi), è cambiata rispetto a quella antecedente (linee nere).

Dalla Fig. 9 si evince, in particolare, che la fascia che separa i bacini dominati dalle bocche di Lido e di Malamocco si è spostata verso la parte centrale della laguna. Si osserva inoltre che l'ampiezza della stessa fascia si è visibilmente ridotta.

Viceversa non sembra essersi apprezzabilmente modificata la posizione dei limiti della fascia di partiacque che separa i bacini dominati dalle bocche di Malamocco e di Chioggia.

Questo risultato conferma ulteriormente come le modificazioni alle bocche di porto abbiano fatto risentire i loro effetti in modo più importante nel bacino di Malamocco. Infatti dalla simulazione modellistica si evince che per effetto dei restringimenti alle bocche si è verificata un'espansione del bacino dominato dalla Bocca di Lido, avvenuta a spese del bacino dominato dalla Bocca di Malamocco.

La posizione delle "fasce di partiacque" ha un ruolo cruciale sull'idrodinamica interna della laguna, perché determina l'ubicazione degli
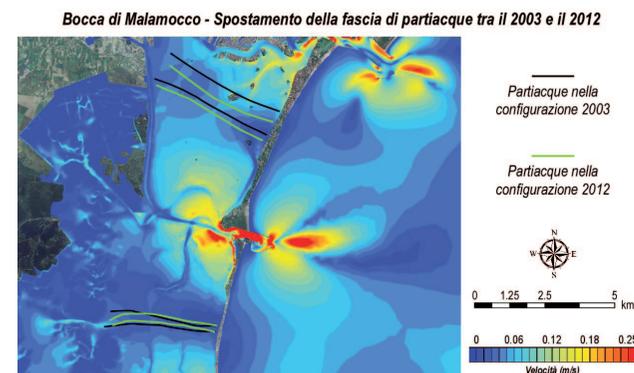
Fig. 9 - Spostamento delle "fasce di partiacque" che delimitano il bacino di Malamocco ottenuta in base ai risultati del modello idrodinamico. Le linee nere si riferiscono alla configurazione ante-operam (2003), le linee verdi alla configurazione post-operam (2012).

specchi d'acqua in cui le correnti di marea sono più deboli e che sono perciò più vulnerabili rispetto alle problematiche legate allo scarso ricambio idrico. La variazione di ampiezza di tali fasce, a sua volta, segnala non trascurabili modificazioni al regime delle correnti locali ed in particolare ai fenomeni di dispersione idrodinamica legati alle correnti secondarie (o "residue") che si sovrappongono al periodico alternarsi delle correnti di marea.

Lo spostamento della "fascia di partiacque" tra i bacini di Lido e di Malamocco può avere peraltro degli effetti da considerare con attenzione anche sulla circolazione delle correnti di marea nei rii e nei canali interni della città di Venezia, dove l'intensità e il verso delle correnti stesse, nelle diverse fasi della marea, sono controllati da piccoli gradienti di livello. Variazioni anche minime, ma differenziate, dell'ampiezza dell'oscillazione della marea e, soprattutto, dei ritardi di fase, possono portare a modifiche significative della velocità della corrente che percorre i canali.

Queste circostanze sono ben evidenziate dalle simulazioni modellistiche che mostrano come, in alcuni canali del Centro Storico si osservino, tra le due configurazioni esaminate, variazioni
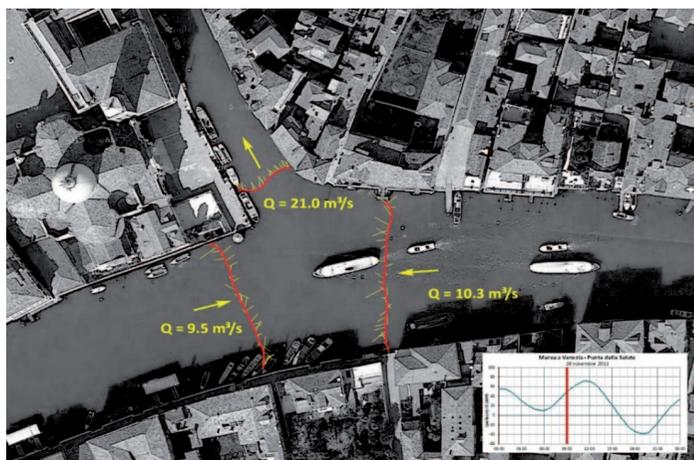
Fig. 10 - Misure correntometriche all'intersezione tra C. Grande – C. Cannaregio effettuata il 26/11/2011 durante una marea crescente (tra le 8.57 e le 9.06). Nelle tre sezioni le misure non sono simultanee per cui la continuità non è rigorosamente rispettata (dati forniti da ing. P. Peretti).

apprezzabili della velocità e, in alcuni casi, anche del verso della corrente.

Che negli ultimi anni si siano verificate modificazioni dell'intensità delle correnti nei canali di Venezia è peraltro un'osservazione sperimentata e riportata da molti cittadini veneziani, non ultimi i gondolieri, spettatori e fruitori interessati delle vie d'acqua più famose del mondo. Questa osservazione è supportata anche da qualche riscontro sperimentale, come le misure correntometriche effettuate nel 2011 all'intersezione tra il Canal Grande e il Rio di Cannaregio (Fig. 10). Diversamente da quello che si riscontrava in passato [24] le misure mostrano che, quando la marea è crescente (fase di flusso), il Rio di Cannaregio riceve l'acqua dal Canal Grande sia dalla direzione di Rialto che da quella della Stazione Ferroviaria. Analogamente, quando la marea è calante (riflusso), le misure indicano che il flusso proveniente dal rio di Cannaregio si divide secondo due direzioni, una verso Rialto e una verso la Stazione. Come conseguenza, la velocità delle correnti

che interessano il rio di Cannaregio sono molto più elevate rispetto a quelle che si riscontrano lungo il Canal Grande, in virtù anche della ben più ampia sezione di quest'ultimo.

6. *Conclusioni*

L'analisi delle registrazioni dei livelli di marea raccolte in numerose stazioni mareografiche attive da anni in laguna di Venezia e nel mare Adriatico antistante ha evidenziato alcune variazioni intervenute a partire dagli anni 2003-2004, che hanno comportato in particolare una riduzione dell'ampiezza delle oscillazioni della marea e un incremento dei ritardi di fase.

Essendo tali variazioni evidenziate da tutte le stazioni all'interno della laguna, ma non dalle stazioni poste in mare (Piattaforma Acqua Alta e mareografi sulle dighe che delimitano le bocche di porto), la conclusione logica è che la causa che ha determinato queste modifiche al regime mareale sia da ricercarsi all'interno della laguna stessa. I risultati delle analisi condotte suggeriscono che tali cambiamenti sono correlati alle modifiche apportate alla geometria delle tre bocche di porto della laguna nell'ambito dei lavori per la costruzione del sistema di paratoie mobili del progetto Mo.S.E., che hanno provocato non trascurabili restringimenti delle sezioni delle bocche stesse.

I dati evidenziano che le variazioni non sono omogenee nel bacino lagunare ma differenziate da zona a zona. Le variazioni risultano, in particolare, maggiori nel bacino centrale e nella laguna settentrionale, il che suggerisce che i varchi che hanno risentito maggiormente delle opere realizzate sono la Bocca di Malamocco e la Bocca di Lido sul varco di Treporti.

Le analisi condotte con il supporto della modellistica numerica hanno confermato queste circostanze e hanno permesso di individuare alcune variazioni sulla posizione dei limiti delle aree di influenza di ciascuna bocca (i cosiddetti "partiacque"). In particolare, la Bocca di Lido sembra aver ampliato la propria area di influenza, a scapito del bacino afferente alla Bocca di Malamocco. Ciò implica delle modifiche sia sul ruolo reciproco delle tre bocche che

alimentano la laguna, sia sui percorsi delle correnti di marea, che si concretizzano in un rafforzamento delle correnti in prossimità della Bocca di Lido rispetto a quelle che competono alla parte centrale della laguna, controllate dalla Bocca di Malamocco.

Anche se per via indiretta, tali cambiamenti possono probabilmente spiegare l'incremento della velocità della corrente che si osserva in alcuni dei canali interni alla città di Venezia, dal momento che i flussi che percorrono i canali sono essenzialmente legati agli sfasamenti istantanei della marea che si realizzano tra il Canal Grande e gli specchi d'acqua lagunari che circondano la città. Questo fenomeno, evidente a chiunque pratichi la navigazione nei canali, rischia di essere sottovalutato, non solo per le conseguenze sulla navigazione, ma soprattutto per i possibili danni arrecati alle antiche costruzioni a diretto contatto con l'acqua. Inoltre, un diverso regime idrodinamico legato ai cambiamenti sulla propagazione della marea potrebbe comportare nel tempo conseguenze non trascurabili sui parametri principali della circolazione lagunare, come i tempi di residenza e di ricambio dell'acqua, soprattutto nelle parti più periferiche della laguna Nord.

È perciò auspicabile che le valutazioni esposte, basate sulla sola analisi dei livelli di marea, possano essere approfondite e perfezionate mediante specifiche indagini sulle correnti lagunari. In particolare, emerge la necessità di valutare, con apposite misure di portata alle bocche di porto, l'entità delle variazioni dei flussi scambiati tra la laguna e il mare per effetto dei restringimenti prodotti dalle opere realizzate.

Parallelamente, dovrebbero essere effettuate indagini sulle correnti nei rii e canali interni della città di Venezia, basate su misure dirette e simulazioni modellistiche, da confrontarsi con dati raccolti in passato, prima della realizzazione delle opere alle bocche di porto [24] [25] [26].

7. *Ringraziamenti*

Si ringraziano gli uffici di ISPRA - Servizio Laguna di Venezia e il Centro Maree del Comune di Venezia per aver reso disponibili i dati

mareografici utilizzati nelle elaborazioni.

Le elaborazioni effettuate sono state in parte sostenute dal contributo di We Are Here Venice (WAHV), weareherevenice.org, associazione non profit che ha come finalità la divulgazione delle informazioni sulle scelte determinanti per il futuro di Venezia.

8. *Bibliografia*

[1] D'Alpaos, L. (1992), *Evoluzione morfologica della laguna di Venezia dal tempo del Denaix ad oggi e sue conseguenze sul regime idrodinamico*, IVSLA, Conterminazione lagunare: storia, ingegneria, politica e diritto nella laguna di Venezia, Venezia.

[2] D'Alpaos L. (2003), *Conoscere il comportamento idrodinamico della laguna del passato per progettare la laguna del futuro*, Atti IVSLA, Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Tomo CLXII (2003-2004).

[3] Dorigo L. (1961), *Le correnti di marea nei porti e nella Laguna di Venezia*, IVSLA, Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia, Rapporti preliminari, 127-147.

[4] Ferla M., Cordella M., Michielli L., Rusconi A. (2007), *Long-term variations on sea level and tidal regime in the lagoon of Venice*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 75, 214-222, doi:10.1016/j.ecss.2007.03.037.

[5] D'Alpaos L. (2010), *Fatti e misfatti di idraulica lagunare. La laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere delle bocche di porto*, IVSLA, Memorie Scienze Fisiche, Venezia.

[6] Polli S. (1952), *Propagazione della marea nella Laguna di Venezia*, Annali di Geofisica, vol. V, n°2, 273-292.

[7] Polli S. (1961), *La propagazione della marea nel golfo di Venezia*, IVSLA, Rapporti preliminari della comm. di studio per la conservazione della Laguna e della città di Venezia. vol. 1., Venezia.

[8] Ferrarin C., Tomasin A., Bajo M., Petrizzo A., Umgiesser G. (2015), *Tidal changes in a heavily modified coastal wetland*, Continental Shelf Research, 101, 22–33, doi: 10.1016/j.csr.2015.04.002.

[9] Tomasin A. (2005), *The software Polifemo for tidal analysis*, Technical Note 202, ISMAR-CNR, Venezia.

[10] Cordella M., Zampato L., Pastore F., Tomasin A., Canestrelli P., Ferla M. (2010), *Le tavole annuali di marea per Venezia*, Atti IVSLA, Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Tomo CLXIX (2010-2011).

[11] ISPRA SLV, ICPSM, CNR-ISMAR (2016), *Previsioni delle altezze di marea per il bacino San Marco e delle velocità di corrente per il Canal Porto di Lido - Laguna di Venezia, Valori astronomici, 2016*, http://www.venezia.isprambiente.it/.

[12] D'Alpaos, L., Defina, A. (1993), *Venice Lagoon Hydrodynamic Simulation by Coupling 2D and 1D Finite Elements Models*, Proceedings of the 8th Conference on "Finite Elements in Fluids. New Trends and Applications", Barcelona, 917-926.

[13] D'Alpaos, L., Defina, A. (1995), *Modellazione matematica del comportamento idrodinamico delle zone di barena solcate da una rete di canali minori*, IVSLA, Rapporti e studi, Vol. XII, 353-372, Venezia.

[14] Defina, A. (2000), *Two dimensional shallow flow equations for partially dry areas*, Water Resources Research, Vol. 36, 11, 3251-3264, doi:10.1029/2000WR900167.

[15] Carniello, L., A. Defina, S. Fagherazzi and L. D'Alpaos (2005). *A combined wind wave-tidal model for the Venice lagoon, Italy. Journal of Geophysical Research – Earth Surface,* 110, F04007, doi:10.1029/2004JF000232.

[16] Carniello, L., A. D'Alpaos, A. Defina (2011), *Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, doi:10.1016/j.ecss.2011.01.001.

[17] Carniello, L., A. Defina and L. D'Alpaos (2012), *Modeling sand-mud transport induced by tidal currents and wind waves in shallow microtidal basins: Application to the Venice Lagoon (Italy)*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, doi:10.1016/j.ecss.2012.03.016

[18] Carniello, L., S. Silvestri, M. Marani, A. D'Alpaos, V. Volpe, and A. Defina (2014), *Sedi-ment dynamics in shallow tidal basins: In situ observations, satellite retrievals, and numerical modeling in the Venice Lagoon*, J. Geophys. Res. Earth Surf., 119, doi:10.1002/2013JF003015.

[19] Defina, A., L. D'Alpaos, and B. Matticchio (1994), *A new set of equations for very shallow water and partially dry areas suitable to 2D numerical models*, in Proceedings of the Specialty Conference on "Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas," edited by P. Molinaro and L. Natale, Am. Soc. of Civ. Eng., New York, 72-81,

[20] Tomasin A. (1974), *Recent changes in the tidal regime in Venice*, Rivista italiana di Geofisica 23 (5-6), 275-278.

[21] ISPRA (2012), *Manuale di mareografia e linee guida per i processi di validazione dei dati mareografici*, Manuali e linee guida 77/2012.

[22] Matticchio B. (2004), *Effetti idrodinamici prodotti da opere fisse alle bocche di porto della laguna di Venezia. Parte I: Parte 1: Idrodinamica locale e resistenze idrauliche*, Atti IVSLA, Venezia, Tomo CLXII, 287-334.

[23] Umgiesser G. (2004), *Effetti idrodinamici prodotti da opere fisse alle bocche di porto della laguna di Venezia. Parte II: Riduzione delle punte di marea ed effetti sul ricambio idrico*. Atti IVSLA, Venezia, Tomo CLXII, 335-376.

[24] Dorigo L. (1966), *Rilievi contemporanei di velocita della corrente di marea nei canali della Giudecca, Fondamenta Nuove, Canal Grande ed in alcuni rii interni della citta*, IVSLA, Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia, Rapporti e Studi, 3, 128-151.

[25] Carrera, F. (1999), *Il comportamento idrodinamico dei canali interni di Venezia*, In: Venezia la citta` dei rii, UNESCO/INSULA, 197 e 207.

[26] Coraci, E., G. Umgiesser and R. Zonta (2007), *Hydrodynamic and sediment transport modelling in the canals of Venice (Italy)*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, doi:10.1016/j.ecss.2007.02.028.